

WPLYW PARAMETRÓW PROCESU KULOWANIA NA CHROPOWATOŚĆ KOMPONENTÓW DRUKOWANYCH METODĄ MEM

The influence of parameters of the shot peening process on the roughness of components printed by the MEM method

Rafał KLUZ, Magdalena BUCIOR, Łukasz PRZESZŁOWSKI, Władysław ZIELECKI

Streszczenie: W pracy dokonano analizy wpływu parametrów procesu kulowania na chropowatość powierzchni dla dwóch modeli wydrukowanych metodą MEM. Modele wykonano w dwóch różnych kierunkach nakładania materiału. Próbkę wykonano z tworzywa ABS. Dokonano również oceny powtarzalności doświadczeń według kryterium Cochran oraz oceny istotności współczynników równania regresji wykorzystującej test t-Studenta. Uzyskane modele matematyczne przedstawiają zależności występujące między parametrami chropowatości a parametrami procesu kulowania.

Słowa kluczowe: szybkie wytwarzanie, druk 3D, metoda MEM, pneumatyczne kulowanie

Abstract: The study analyzes the influence of shot peening process parameters on the surface roughness for the two models printed using the MEM method. The models were made in two different variants. The samples were made of ABS plastic. Also, the repeatability of experiments according to the Cochran criterion as well as the significance of the coefficients of the regression equation using the Student's t-test was also evaluated. The resulting mathematical models represent the relationships between the roughness parameters and shot peening process parameters.

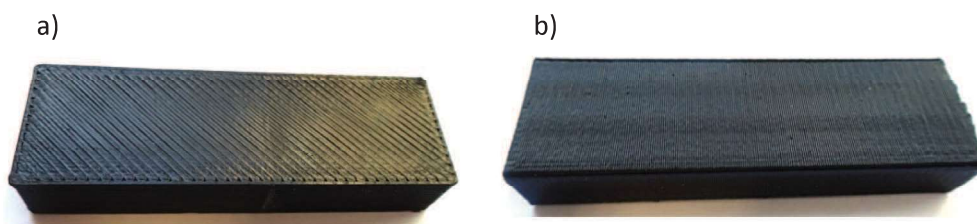
Keywords: Rapid Prototyping, 3D printing, MEM method, pneumatic shot peening

Wprowadzenie

Rozwój technologii oraz wzrost konkurencji na rynku wprowadza konieczność obniżania kosztów produkcji przy jednoczesnym ciągłym doskonaleniu jakości wyrobów. Jedną z technologii zyskujących w ostatnich latach coraz większą popularność są przyrostowe metody wytwarzania. Technologia ta została stworzona głównie z myślą o produkcji prototypów, form czy matryc [4]. Prototypy wykonane metodami Rapid Manufacturing (RM) oraz Rapid Prototyping (RP) często stosowane są jako modele wzorcowe w badaniach procesów technologicznych czy funkcjonalnych, pozwalają na wykonywanie gotowych wyrobów możliwych do zastosowania jako elementy nośne czy konstrukcyjne maszyn oraz urządzeń stosowanych w różnych gałęziach przemysłu [7]. Metody szybkiego wytwarzania znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach [2, 3], m.in. w przemyśle lotniczym, spożywczym, medycynie, stomatologii czy wzornictwie przemysłowym. Prototypy wytwarzane w technologii RM mogą być stosowane do wytwarzania elementów lotniczych układów napędowych, kadłubów [7], czy w konstrukcji maszyn do wytwarzania prototypów kół zębatych [1]. Wśród technologii Rapid Manufacturing można wyróżnić kilka metod przyrostowych, do których można zaliczyć np. SLS (Selective Laser Sintering) selektywne spiekanie laserowe proszków, SLM (Selective Laser Melting) selektywne stapianie laserowe materiałów sproszkowanych czy FDM (Fused Deposition Modeling) modelowanie ciekłym tworzywem termoplastycznym [8].

Jedną z najpopularniejszych technik wytwarzania wykorzystującą modele 3D-CAD jest metoda FDM/ MEM, która polega na budowaniu modelu z półpłynnego materiału termoplastycznego za pomocą rozgrzewanej dyszy [1]. Dysza umieszczona jest w korpusie głowicy z podajnikiem (ekstruderem) materiału, tzw. filamentem [5]. Dysza wraz z głowicą przemieszcza się w osiach X i Y, a stół roboczy w osi Z. W przypadku metody MEM można zastosować tylko jedną dyszę dla jednego materiału, z którego wykonywany jest prototyp i konstrukcje podpierające [7]. Do materiałów wykorzystywanych w metodzie FDM/MEM zaliczyć można ABS, PLA, wosk czy poliwęglan. Tworzywa sztuczne charakteryzujące się lepszą wytrzymałością mechaniczną, odpornością chemiczną, odpornością na korozję czy wysoką odpornością na ścieranie oraz niewielki ciężar to główne zalety komponentów wykonanych z tych materiałów w porównaniu do tradycyjnych materiałów stosowanych w konstrukcji maszyn. Wpływają one również na zasadność zastosowania tej metody w produkcji jednostkowej oraz wytwarzaniu prototypów [4]. Do wad tej technologii należą m. in. ograniczenia wymiarowe tworzonych elementów, długi czas druku czy niewystarczająca dokładność, z którą wiąże się konieczność dodatkowej obróbki mechanicznej.

Wysoka chropowatość elementów drukowanych metodą MEM jest jedną z głównych wad tej technologii. W związku z tym przeprowadzono badania eksperymentalne, mające na celu zastosowanie jednej z metod obróbki powierzchniowej, która poprawiłaby jakość drukowanych komponentów. W pracy skupiono się na analizie wpływu parametrów procesu pneumatycznego kulowania na



Rys. 1. Próbkę wypełnioną pod kątem: a) 45° o gęstości wypełnienia 65%, b) 90° o gęstości wypełnienia 65%
Fig. 1. Sample filled at an angle of: a) 45° with a filling density of 65%, b) 90° with a filling density of 65%

chropowatość powierzchni dla dwóch modeli wydrukowanych metodą MEM. Modele wykonano w dwóch różnych kierunkach nakładania materiału z tworzywa ABS o gęstości wypełnienia 65%.

Metodyka badań

Do badań użyto próbek wydrukowanych w dwóch różnych kierunkach nakładania materiału, pod kątem 45° oraz 90° o gęstości wypełnienia 65% (rys. 1). Modele wykonane z tworzywa ABS firmy Finnotech w kolorze czarnym na drukarce UP BOX + (rys. 2). Budowanie modelu metodą MEM na tym urządzeniu polega na nakładaniu warstwowym rozgrzanego to temperatury płynięcia termoplastycznego polimeru. Przestrzeń robocza maszyny jest zamknięta, a wielkość zabudowy wynosi 255 × 205 × 205. Podstawowe parametry wytwarzania detali w metodzie przyrostowej MEM przedstawiono w tab. I.



Rys. 2. Urządzenie pracujące w metodzie przyrostowej MEM
Fig. 2. Device working in MEM incremental forming method

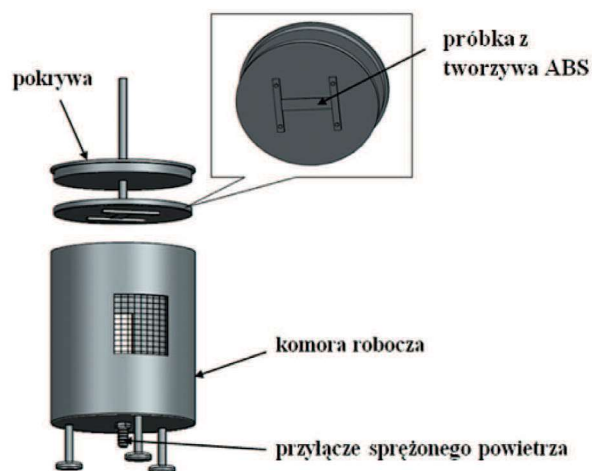
Tabela I. Podstawowe parametry wytwarzania detalu w metodzie przyrostowej MEM

Table I. Basic parameters of detail production in MEM incremental forming method

Grubość warstwy	0,2 [mm]
Temperatura głowicy	270 [°C]
Temperatura stołu	90 [°C]
Stopień wypełnienia	65 [%]
Temperatura komory drukarki	45 [°C]
Materiał	ABS
Średnica filamentu	1,75 [mm]

W pierwszym etapie badań próbkę o wymiarach 63 × 20 × 10 mm zamocowano w urządzeniu do kulowania (rys. 3), gdzie następnie ją kulowano przyjmując odpowiednio wartości podane w tab. II. Parametrami zmiennymi w doświadczeniu był czas kulowania t oraz ciśnienie p . Średnica kulek d_k w doświadczeniu była parametrem stałym i wynosiła 1,5 mm, została ona tak dobrana, aby stopień pokrycia powierzchni w badanym czasie był jak największy. Odległość próbki od dyszy wynosiła $l = 250$ mm. Jako wariant wyjściowy (wariant nr 1) przyjęto próbki z powierzchnią nieobrabaną mechanicznie, bezpośrednio po wydruku metodą MEM.

Chropowatość powierzchni zmierzono za pomocą profilometru stykowego Surtronic 25 Taylor Hobson na odcinku pomiarowym równym 4 mm, zgodnie z normą PN EN-ISO 4287:1999 [8].



Rys. 3. Urządzenie do kulowania
Fig. 3. Device for shotpeeningprocess

Tabela II. Warianty przyjęte w procesie pneumokulowania
Table II. Variants adopted in the pneumatic shot peening process

Nr próbki	Parametry technologiczne pneumokulowania	
	t [min]	p [MPa]
2	2	0,2
3	3	0,2
4	2	0,4
5	3	0,4

Wyniki badań

W pracy przeprowadzono analizę powtarzalności doświadczeń oraz dokonano oceny istotności współczynników równania regresji. Szczególną uwagę zwrócono na dwa parametry amplitudy a mianowicie na parametr Ra – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu oraz parametr Rz – wysokość chropowatości według dziesięciu punktów.

Ocenę powtarzalności warunków doświadczeń przeprowadzono wg kryterium Cochra. W tab. III przedstawiono obliczone wartości współczynnika G wg wzoru 1 dla próbek wypełnionych pod kątem 45° oraz 90°. Otrzymane wartości porównano z wartością krytyczną G_{kr} (4) przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz w zależności od liczby stopni swobody (2–3). W przypadku, gdy powtarzalność warunków doświadczeń uznawano za zadowalającą.

Tabela III. Wyniki analizy powtarzalności warunków doświadczeń ($\alpha = 0,05$)

Table III. Results of the repeatability analysis of the experimental conditions ($\alpha = 0,05$)

Współczynnik	Próbki wypełnione pod kątem 45°		Próbki wypełnione pod kątem 90°
	Badany parametr		
G	Ra	Rz	Ra
	0,477	0,559	0,898

$$G = \frac{S^2 y_{i\max}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} \quad (1)$$

$$f_1 = N = 4 \quad (2)$$

$$f_2 = r - 1 = 1 \quad (3)$$

$$G_{kr} = G_{(\alpha, f_1, f_2)} = 0,9065 \quad (4)$$

gdzie:

$S^2(y)$ – wariancja błędów pomiaru,

N – całkowita liczba doświadczeń,

r – liczba powtórzeń w doświadczeniu,

f_1 – liczba stopni swobody dla licznika,

f_2 – liczba stopni swobody dla mianownika.

W kolejnym kroku dokonano oceny istotności współczynników równania regresji wykorzystującej test t -Studenta. Następnie po określeniu istotności określono równania opisujące wpływ parametrów pneumatyzacji na chropowatość powierzchni dla próbek wypełnionych pod kątem 45° (5–6) oraz dla próbek wypełnionych pod kątem 90° (7–8).

$$Ra = 5,065 + 0,888 t + 0,365 p \quad (5)$$

$$Rz = 21,156 + 3,856 t + 2,781 p + 1,531 tp \quad (6)$$

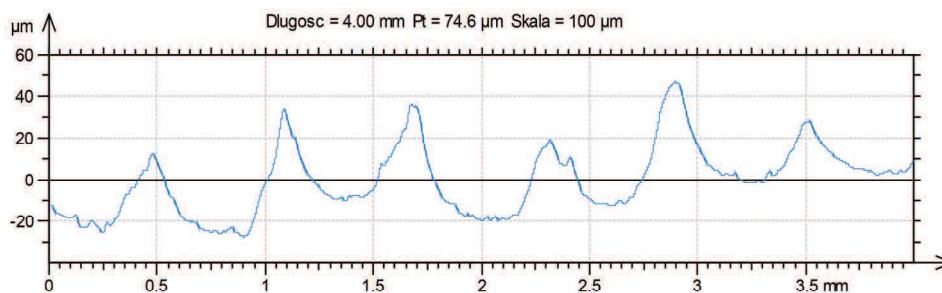
$$Ra = 6,321 - 1,266 t - 1,788 p + 0,884 tp \quad (7)$$

$$Rz = 33,787 + 4,487 t + 9,237 p + 3,187 tp \quad (8)$$

Analizując uzyskane równania (5–8) dla parametrów chropowatości takich jak Ra i Rz można stwierdzić, że znaczący wpływ na chropowatość powierzchni w obydwu analizowanych wariantach miał czas kulowania, ciśnienie zasilania, oraz interakcja obu analizowanych parametrów technologicznych.

Pomiary chropowatości powierzchni wskazują, że kierunek wypełnienia w dużym stopniu wpływa na jakość powierzchni. W przypadku próbek wypełnionych pod kątem 90° ($Ra = 17,1 \mu\text{m}$) zaobserwowano większą chropowatość powierzchni o 46%, w porównaniu do próbek wypełnionych pod kątem 45° gdzie $Ra = 9,22 \mu\text{m}$. Potwierdzają to również przedstawione profile chropowatości dla wariantu wyjściowego (rys. 4 i 6) oraz wariantu nr 5 (rys. 5 i 7). Najmniejszą chropowatość w obydwu analizowanych przypadkach uzyskano dla wariantu nr 5 ($t = 3 \text{ min}$, $p = 0,4 \text{ MPa}$). Natomiast największą chropowatość uzyskano dla czasu kulowania $t = 2 \text{ min}$ oraz ciśnienia $p = 0,2 \text{ MPa}$ (wariant nr 2).

Analizując wykresy (8–9) można zaobserwować korzystny wpływ pneumatyzacji na chropowatość powierzchni. W przypadku próbki wypełnionej pod kątem 90° dla wariantu nr 5 parametry chropowatości takie jak Ra i Rz zmniejszyły się odpowiednio o 76% oraz 68% w porównaniu do wariantu wyjściowego. Z kolei dla próbki wypełnionej pod kątem 45° parametr Ra zmniejszył się o 57%, natomiast parametr Rz o 55% w porównaniu

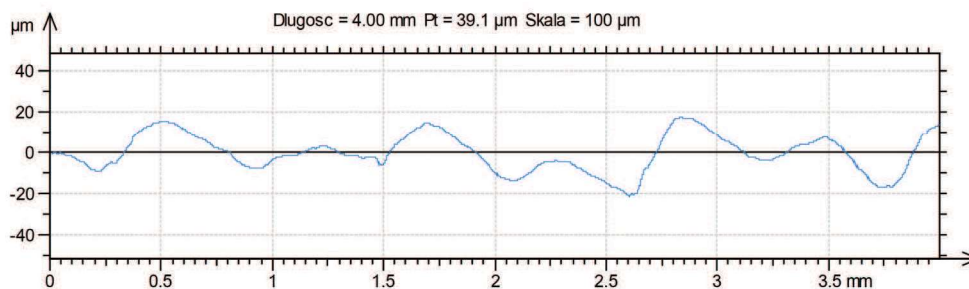


Rys. 4. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 45° (wariant nr 1).

Parametry amplitudy: $R_p = 26,7 \mu\text{m}$, $R_v = 12 \mu\text{m}$, $R_z = 38,7 \mu\text{m}$, $R_c = 39,8 \mu\text{m}$, $R_t = 47,7 \mu\text{m}$, $R_a = 9,22 \mu\text{m}$, $R_q = 11 \mu\text{m}$

Fig. 4. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 45° (variant No. 1).

Amplitude parameters: $R_p = 26,7 \mu\text{m}$, $R_v = 12 \mu\text{m}$, $R_z = 38,7 \mu\text{m}$, $R_c = 39,8 \mu\text{m}$, $R_t = 47,7 \mu\text{m}$, $R_a = 9,22 \mu\text{m}$, $R_q = 11 \mu\text{m}$

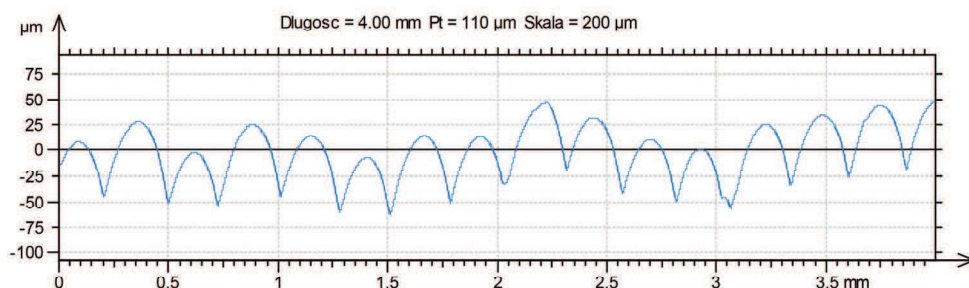


Rys. 5. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 45° (wariant nr 4).

Parametry amplitudy: $R_p = 8,67 \mu\text{m}$, $R_v = 8,57 \mu\text{m}$, $R_z = 17,25 \mu\text{m}$, $R_c = 15,75 \mu\text{m}$, $R_t = 23,3 \mu\text{m}$, $R_a = 3,99 \mu\text{m}$, $R_q = 4,8 \mu\text{m}$

Fig. 5. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 45° (variant No. 4).

Amplitude parameters: $R_p = 8,67 \mu\text{m}$, $R_v = 8,57 \mu\text{m}$, $R_z = 17,25 \mu\text{m}$, $R_c = 15,75 \mu\text{m}$, $R_t = 23,3 \mu\text{m}$, $R_a = 3,99 \mu\text{m}$, $R_q = 4,8 \mu\text{m}$

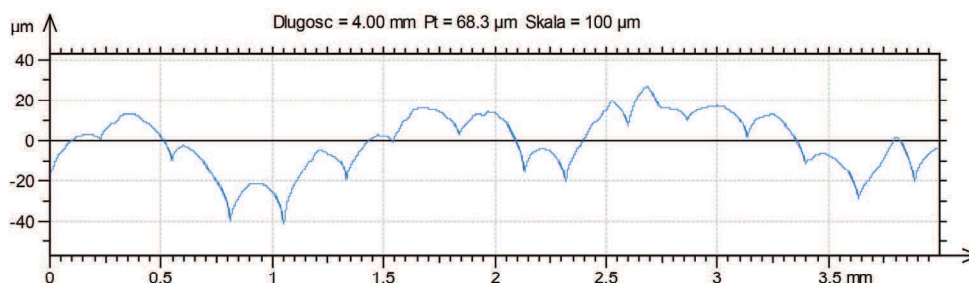


Rys. 6. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 90° (wariant nr 1).

Parametry amplitudy: $R_p = 28,1 \mu\text{m}$, $R_v = 43,9 \mu\text{m}$, $R_z = 72 \mu\text{m}$, $R_c = 64,8 \mu\text{m}$, $R_t = 75,3 \mu\text{m}$, $R_a = 17,1 \mu\text{m}$, $R_q = 20,1 \mu\text{m}$

Fig. 6. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 90° (variant No. 1).

Amplitude parameters: $R_p = 28,1 \mu\text{m}$, $R_v = 43,9 \mu\text{m}$, $R_z = 72 \mu\text{m}$, $R_c = 64,8 \mu\text{m}$, $R_t = 75,3 \mu\text{m}$, $R_a = 17,1 \mu\text{m}$, $R_q = 20,1 \mu\text{m}$



Rys. 7. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 90° (wariant nr 4).

Parametry amplitudy: $R_p = 7,87 \mu\text{m}$, $R_v = 15,4 \mu\text{m}$, $R_z = 23,25 \mu\text{m}$, $R_c = 17,4 \mu\text{m}$, $R_t = 29,1 \mu\text{m}$, $R_a = 4,15 \mu\text{m}$, $R_q = 5,17 \mu\text{m}$

Fig. 7. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 90° (variant No. 4).

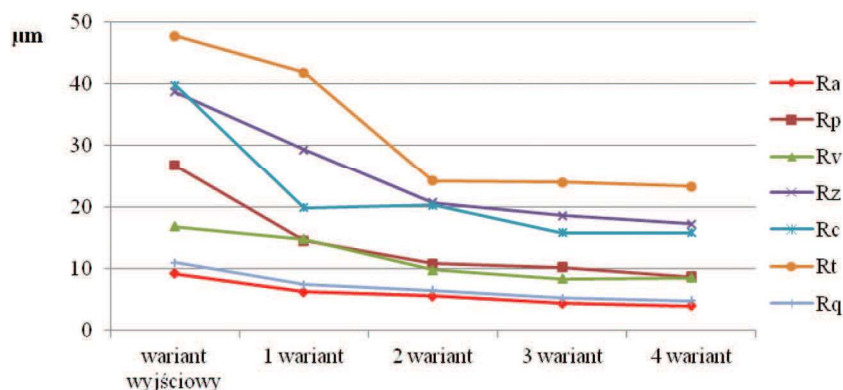
Amplitude parameters: $R_p = 7,87 \mu\text{m}$, $R_v = 15,4 \mu\text{m}$, $R_z = 23,25 \mu\text{m}$, $R_c = 17,4 \mu\text{m}$, $R_t = 29,1 \mu\text{m}$, $R_a = 4,15 \mu\text{m}$, $R_q = 5,17 \mu\text{m}$

do wariantu nr 1. Wraz ze zwiększaniem parametrów procesu kulowania chropowatość powierzchni maleje.

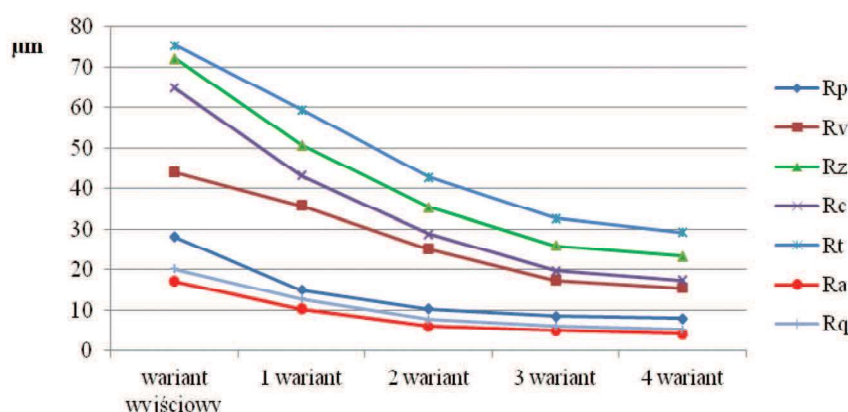
Wnioski

W artykule przedstawione zostały wyniki badań chropowatości powierzchni dla próbek wydrukowanych z tworzywa ABS, które następnie poddano pneumatycznemu kulowaniu. Znaczący wpływ na chropowatość powierzchni w obydwu analizowanych przypadkach miał czas kulowania, ciśnienie oraz interakcja obu analizowanych parametrów

technologicznych procesu kulowania. Wraz ze wzrostem parametrów technologicznych procesu chropowatość maleje. Największą chropowatość uzyskano dla czasu kulowania $t = 2 \text{ min}$ oraz ciśnienia $p = 0,2 \text{ MPa}$, a najmniejszą dla $t = 3 \text{ min}$, $p = 0,4 \text{ MPa}$. Parametr R_a w wyniku kulowania dla wariantu nr 5 zmniejszył się odpowiednio o 76% oraz 57% dla próbki wypełnionej pod kątem 90° oraz 45° w porównaniu do próbki bezpośrednio po wydruku. Z kolei parametr R_z zmniejszył się w zakresie 55%–68%. Znaczący wpływ na chropowatość powierzchni ma również kierunek wypełnienia. Mniejszą chropowatość



Rys. 8. Parametry chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 45°
Fig. 8. Roughness parameters for a specimen filled at an angle of 45°



Rys. 9. Parametry chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 90°
Fig. 9. Roughness parameters for a specimen filled at an angle of 90°

o 46% uzyskano w przypadku próbek wypełnionych pod kątem 45° w porównaniu do próbek wypełnionych pod kątem 90°.

Podsumowując można stwierdzić, że pneumokulowanie może być stosowane w celu poprawy jakości powierzchni elementów drukowanych z tworzywa ABS.

LITERATURA

- [1] Budzik G. et. al. 2016. „Wykorzystanie szybkiego prototypowania do wykonania kół zębatych na przykładzie metody MEM”. *Przegląd Mechaniczny* (3): 14–16.
- [2] Budzik G. 2009. „Odzworowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1–145.
- [3] Chlebus E. 2000. „Techniki komputerowe CAx i inżynierii produkcji”. Warszawa: WNT.
- [4] Dziubek T., M. Filip. 2015. „Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania”. *Mechanik* (12): 54–61.
- [5] Miazio Ł. 2015. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik* (7): 533–538.
- [6] Norma PN EN-ISO 4287:1999. Specyfikacja geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni:

Metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

- [7] Sęp J., G. Budzik. 2015. „Możliwości aplikacyjne technologii Rapid Manufacturing w przemyśle lotniczym”. *Mechanik* (12): 169–172.
- [8] Siemiński P., G. Budzik. 2015. „Techniki przyrostowe”. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

dr inż. Rafał Kluz – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkluz@prz.edu.pl

dr inż. Magdalena Bucior – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: magdabucior@prz.edu.pl

dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRz – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: wzktmiop@prz.edu.pl

dr inż. Łukasz Przeszłowski – Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: lprzeszl@prz.edu.pl